

Kaji Eksperimental Sistem Refrigerasi Tabung *Vortex* dengan Pengaruh Variasi Sudut Katup Sumbat dan Tekanan *Input*

Akbar Maulana^{1,*}, Apip Badarudin², Bowo Yuli Prasetyo³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

¹E-mail : akbar.maulana.tptu21@polban.ac.id;

²E-mail : apipbdr@polban.ac.id;

³E-mail : bowo_yuli@polban.ac.id

ABSTRAK

Sistem refrigerasi tabung *vortex* merupakan pendingin sekaligus pemanas. media pendingin tabung *vortex* adalah udara bertekanan. Tabung *vortex* tidak menggunakan refrigeran sehingga sangat ramah lingkungan, namun belum ada yang melakukan penelitian terhadap kapasitas pendinginan dan temperatur udara dingin keluaran tabung *vortex* mengenai pengaruh katup sumbat. Tujuan penelitian ini supaya dapat mengetahui kapasitas pendinginan dan temperatur udara dingin terhadap katup sumbat dan tekanan *input*. Variasi sudut katup sumbat pada penelitian ini menggunakan sudut 30°, 60° dan 90°. Masing-masing sudut diuji menggunakan tekanan 1 bar_{gauge}, 2 bar_{gauge}, 3 bar_{gauge} dan 4 bar_{gauge}. Hasil dari pengujian kapasitas pendinginan dan temperatur udara dingin keluaran tabung *vortex* didapat bahwa variasi sudut 30° mampu mencapai temperatur dingin lebih rendah dan kapasitas pendinginan lebih besar dibandingkan variasi sudut yang lain.

Kata kunci

Tabung vortex, Tekanan udara masukan, Katup sumbat, Kapasitas pendinginan, Temperatur dingin.

ABSTRACT

The vortex tube refrigeration system is both a cooler and a heater. The cooling medium for the vortex tube is pressurized air. Vortex tubes do not use refrigerants so they are very environmentally friendly, but no one has conducted research on the cooling capacity and temperature of the cold air output from vortex tubes regarding the effect of plug valves. The aim of this research is to determine the cooling capacity and cold air temperature of the plug valve and input pressure. Variations in the angle of the plug valve and variations in pressure are carried out in order to determine the temperature of the cold air and the cooling capacity of the vortex tube. Variations in the angle of the plug valve in this study used angles of 30°, 60° and 90°. Each corner was tested using 1 bar_{gauge}, 2 bar_{gauge}, 3 bar_{gauge} and 4 bar_{gauge} pressure. The results of testing the cooling capacity and temperature of the cold air output from the vortex tube showed that the 30° angle variation was able to achieve lower cold temperatures and greater cooling capacity compared to other angle variations.

Key words

Vortex tube, Intake air pressure, Control valve, Cooling capacity, Cold temperature.

1. PENDAHULUAN

Sistem refrigerasi tabung *vortex* merupakan pendingin sekaligus pemanas. media pendingin tabung *vortex* adalah udara bertekanan [1]. Tabung *vortex* tidak menggunakan refrigeran sehingga sangat ramah lingkungan [2]. Katup sumbat (*control valve*) pada sistem tabung *vortex* dapat mengatur temperatur udara panas keluaran sehingga akan berpengaruh terhadap aliran udara

pusar balik pada sisi temperatur udara dingin [3]. Udara yang diekspansikan dapat menghasilkan dua aliran yaitu *vortex* primer dan *vortex* sekunder yang berlawanan arah pada arah aksial dan terjadi di dalam tabung yang sama, *vortex* primer bergerak mengelilingi sisi penampang tabung sedangkan *vortex* sekunder bergerak pada tengah tabung [4]. Udara bertekanan atau udara yang dikompresi masuk melewati nosel sehingga udara berekspansi dengan kecepatan tinggi (*sonic speed*) aliran udara pusaran selanjutnya dihasilkan pada *chamber* kemudian udara bergerak secara spiral

sepanjang penampang dinding tabung aliran tersebut terhambat oleh katup sumbat [5]. Ketika tekanan udara dekat katup sumbat lebih tinggi dari tekanan atmosfer dengan menutup katup sumbat, maka laju aliran udara balik akan mengalir pada bagian sumbu tabung mulai dari sisi tekanan tinggi ke sisi tekanan rendah. Perpindahan energi berlangsung antara udara balik dan udara maju pada proses ini, sehingga aliran udara balik yang terdapat di sumbu tabung mempunyai temperatur lebih rendah dari temperatur *input* atau masukan dikarenakan melewati lubang diafragma atau *orifice* [6]. Kelebihan sistem ini yaitu konstruksinya sangat sederhana, tidak ada komponen penggerak dan tanpa menggunakan refrigeran sebagai media pendingin [7]. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kapasitas pendinginan dan temperatur udara dingin keluaran pada sistem refrigerasi tabung *vortex* berdasarkan variasi sudut katup sumbat dan variasi tekanan *input* [8].

2. METODOLOGI

Metode penelitian ini meliputi analisis grafik, perancangan model sistem, instalasi pembuatan alat, uji coba alat dan pengambilan serta pengolahan data. Perhitungan pada penelitian ini menggunakan perhitungan analisis hukum termodinamika, penelitian ini dilakukan pada tiga variasi sudut katup sumbat yaitu menggunakan sudut 30°, 60° dan 90°, serta variasi tekanan *input* menggunakan tekanan 1 bar_{gauge}, 2 bar_{gauge}, 3 bar_{gauge} dan 4 bar_{gauge} [9]. Langkah-langkah tersebut diperlukan agar mampu menampilkan nilai serta data yang akurat dari setiap parameter yang diukur [10].

2.1. Analisis Hukum Termodinamika Sistem Refrigerasi Tabung *Vortex*

1. Nilai Debit Udara Standar

Menghitung nilai debit udara, harus menggunakan udara kondisi standar (1 atm standar, 20°C), sehingga dibutuhkan koreksi terhadap debit udara yang terbaca pada alat pengukur debit udara.

$$\dot{V}_{c, std} = \dot{V} \sqrt{\frac{293}{1,01325} \frac{P_g}{T}} \quad (1)$$

Keterangan:

P = Tekanan udara dingin keluaran yang terukur [Bar]

T = Temperatur udara dingin keluaran yang

terukur [°C]

2. Hukum Konservasi Massa

Nilai laju aliran massa udara keluaran terdiri dari laju aliran massa udara dingin ditambah laju aliran massa udara panas, sehingga:

$$\dot{m}_m = \dot{m}_c + \dot{m}_h \quad (2)$$

$$\dot{m}_c = \rho_{std} \times \dot{V}_{c, std} \quad (3)$$

$$\dot{m}_h = \rho_{std} \times \dot{V}_{h, std} \quad (4)$$

Keterangan:

\dot{m}_m = Laju aliran massa udara masukan [kg/s]

\dot{m}_k = Laju aliran massa udara keluaran [kg/s]

\dot{m}_c = Laju aliran massa udara *cold* keluar [kg/s]

\dot{m}_h = Laju aliran massa udara *hot* keluar [kg/s]

ρ = Massa jenis udara standar (1,2 kg/m³), (ASHRAE, *Fundamental* 2005, chapter 30.13)

3. Penurunan dan Kenaikan Temperatur Separasi Udara

$$\Delta T_c = T_m - T_c \quad (5)$$

$$\Delta T_{c,i} = T_m - T_{c,i} = T_m \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_m} \right) \right) \quad (6)$$

$$\Delta T_h = T_h - T_m \quad (7)$$

Keterangan:

ΔT_c = Penurunan temperatur udara *cold* [°C]

T_m = Temperatur udara mampat masukan [°C]

T_c = Temperatur udara *cold* keluaran [°C]

P_a = Tekanan atmosfer [Bar]

P_m = Tekanan masukan [Bar]

γ = Perbandingan jenis udara = 1,4

ΔT_h = Kenaikan temperatur udara [°C]

T_m = Temperatur udara mampat masukan [°C]

T_h = Temperatur udara panas keluaran [°C]

4. Fraksi Massa Udara Dingin

Didefinisikan sebagai perbandingan antara laju aliran massa udara dingin keluaran dengan laju aliran massa udara masukan.

$$\mu_c = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_m} \quad (8)$$

Keterangan:

- μ_c = Fraksi massa udara dingin [kg/s]
- \dot{m}_c = Laju aliran massa udara dingin keluaran [kg/s]
- \dot{m}_m = Laju aliran massa udara masukan [kg/s]

5. Kapasitas Pendinginan Tabung *Vortex*

Besarnya kapasitas tabung *vortex* tergantung pada laju aliran massa udara dingin keluaran dan penurunan temperatur.

Besarnya kapasitas pendinginan tabung *vortex* adalah:

$$Q_c = \dot{m}_c c_p \Delta T_c \quad (9)$$

Keterangan:

- Q_c = Kapasitas pendinginan udara [kW]
- \dot{m}_{dc} = Laju aliran massa udara dingin keluaran [kg/s]
- c_p = Kalor spesifik udara [1,23 kJ/kg]
- ΔT_c = Penurunan temperatur [°C]

6. Efisiensi Adiabatic

Efisiensi adiabatic merupakan perkalian dari fraksi massa udara dingin keluaran dengan penurunan temperatur udara dingin keluaran dibagi dengan penurunan temperatur udara dingin karena isentropik.

$$\eta = \mu_c \frac{\Delta T_c}{\Delta T_{c,i}} \quad (10)$$

Keterangan:

- η = *Efisiensi* adiabatic
- μ_c = Fraksi massa udara dingin
- ΔT_c = Penurunan temperatur udara dingin [°C]
- $\Delta T_{c,i}$ = Penurunan temperatur udara isentropik [°C]

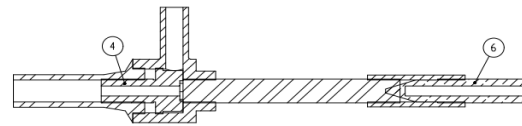
2.2. Perancangan Model Sistem

Desain sistem tabung *vortex* yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah menggunakan material bahan yang terbuat dari bahan *stainless steel*, dengan penggunaan bahan material *stainless steel* diharapkan pusingan udara pada tabung minim terhadap rugi-rugi gesekan sehingga pusingan pada tabung dapat menghasilkan temperatur udara dingin maksimal. Desain sistem tabung *vortex* dibuat mengacu seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. *Prototype* sistem tabung *vortex*

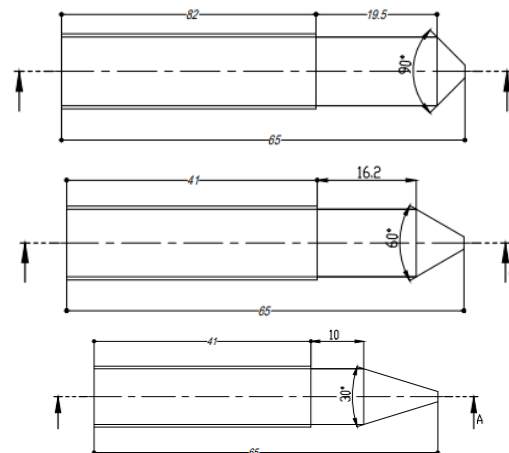
Pada penelitian ini dimensi alat serta ukuran merupakan hasil desain yang penulis buat dengan model atau jenis yaitu *counter flow vortex tube*, seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Skematik model desain tabung *vortex*

Variasi sudut katup sumbat pada penelitian ini diharapkan dapat mengetahui kapasitas pendinginan serta temperatur udara dingin keluaran dari sistem refrigerasi tabung *vortex* yang dapat menghasilkan temperatur udara dingin keluaran paling rendah dan kapasitas pendinginan paling besar.

Desain katup sumbat yang dibuat menggunakan variasi sudut yaitu 30°, 60° dan 90°, dengan diameter lubang 2 mm dan panjang 65 mm. Katup sumbat merupakan pengatur laju aliran udara yang keluar. Pada perbedaan sudut ini diharapkan dapat mengetahui temperatur udara dingin serta kapasitas pendinginan tabung *vortex* paling baik diantara ketiga sudut tersebut, untuk desain katup sumbat dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain katup sumbat

2.3. Jalannya Pengambilan Data

Prosedur jalannya pengambilan data dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Menghidupkan kompresor udara
- 2) Membuka katup K1
- 3) Udara kompresi yang akan digunakan dengan cara mengatur *pressure regulator* dan membuka katup K2.
- 4) Memasangkan katup sumbat yang akan digunakan pada pengambilan data dengan variasi perbedaan sudut yaitu sudut 30°, 60° dan 90°.
- 5) Mengambil serta mencatat data awal seperti temperatur lingkungan, temperatur masukan (T_m), temperatur panas (T_h), temperatur dingin keluaran (T_c), temperatur dingin dekat *pressure gauge* (T_c'), tekanan udara masukan (P_m), tekanan dingin keluaran (P_c), dan kecepatan laju aliran (m/s).
- 6) Melakukan pengambilan data setiap satu menit sekali untuk mengetahui katup sumbat mana yang dapat mencapai temperatur keluaran dingin terendah dan paling stabil.
- 7) Mengatur tekanan masukan agar stabil dengan cara mengatur *pressure regulator*.
- 8) Lakukan pencatatan data yang didapat dengan besaran seperti pada no. lima.
- 9) Tutup kembali katup K2 dan ulangi percobaan dengan melakukan penggantian katup sumbat yang telah disiapkan.
- 10) Atur tekanan masukan yang akan digunakan sampai mencapai temperatur dingin keluaran stabil.
- 11) Ulangi langkah-langkah pengambilan data seperti di atas dengan variasi katup sumbat dan tekanan masuk yang akan digunakan.

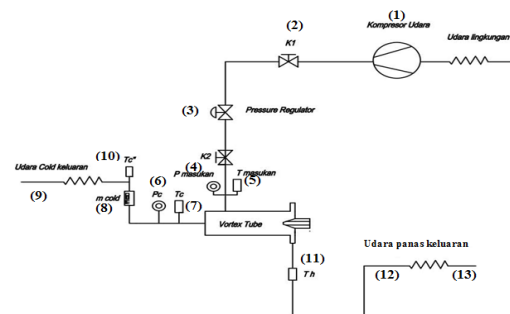
2.4. Titik Pengukuran Pengambilan Data

Parameter titik pengukuran pengambilan data yang dibutuhkan seperti pada Tabel 1 di bawah ini:

Tabel 1. Posisi titik pengukuran

No	Variabel Pengukuran	Nomor Titik Ukur	Satuan	Simbol
1.	Temperatur udara masukan	5	°C	T_m
2.	Temperatur	7	°C	T_c

	udara dingi keluaran			
3.	Temperatur udara panas keluaran	11	°C	T_h
4.	Temperatur udara dingin dekat <i>pressure gauge</i>	10	°C	T_c'
5.	Temperatur lingkungan	1	°C	T_L
6.	Tekanan udara kompresi masukan	6	Bar	P_m
7.	Tekanan udara dingin keluaran	8	Bar	P_c
8.	Tekanan udara panas keluaran	12	Bar	P_h
9.	Kecepatan aliran udara dingin keluaran	9	m/s	V
10.	Kecepatan aliran udara panas keluaran	13	m/s	V



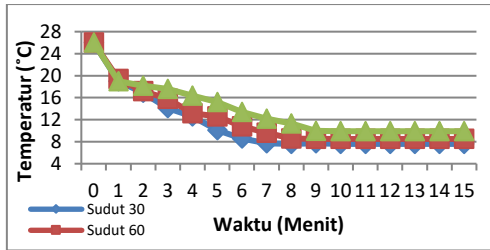
Gambar 4. Skematik titik pengukuran

Pada pengujian sistem refrigerasi tabung *vortex* ini penempatan alat ukur serta titik ukur pengambilan data seperti pada Gambar 4 sehingga dapat mendukung pelaksanaan pengambilan data dan pengujian sistem pada penelitian yang dilakukan.

3. HASIL DAN ANALISIS DATA

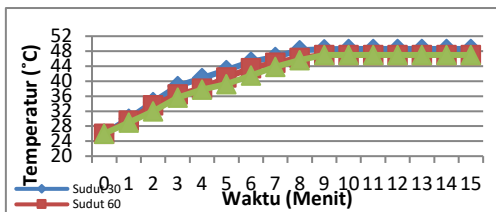
3.1. Pengaruh Tekanan *Input* Terhadap Temperatur

Variasi katup sumbat pada sudut 30° mampu mencapai temperatur paling rendah dibandingkan dengan variasi sudut yang lain, disebabkan sudut 30° mempunyai bentuk lebih runcing dibandingkan variasi sudut yang lain.



Gambar 5. Grafik temperatur udara dingin pada tekanan 4 Bar

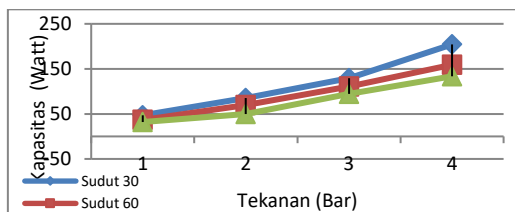
Kenaikan temperatur hampir konstan semuanya pada menit ke 10 tidak terjadi kenaikan temperatur seperti pada Gambar 6. Berdasarkan data tersebut membuktikan bahwa semakin besar energi yang masuk ke dalam sistem maka temperatur udara panas keluaran semakin tinggi dikarenakan tabung *vortex* adalah sistem yang mengalami proses *adiabatic* sehingga tidak terpengaruh oleh kondisi lingkungan, oleh karena itu *output* yang dihasilkan sesuai berdasarkan dengan energi yang masuk ke dalam sistem.



Gambar 6. Grafik temperatur udara panas pada tekanan 4 Bar

3.2. Pengaruh Tekanan *Input* Terhadap Kapasitas Pendinginan

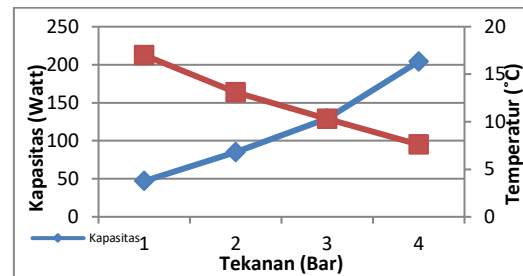
Hasil perhitungan kapasitas pendinginan paling tinggi yaitu pada variasi sudut 30° hal tersebut berbanding lurus dengan hasil data pengukuran temperatur udara dingin keluaran pada variasi sudut 30°, temperatur udara keluaran sudut 30° paling rendah dibandingkan dengan variasi sudut katup sumbat yang lain, sehingga nilai kapasitas pendinginan akan tinggi apabila temperatur udara dingin keluaran semakin rendah.



Gambar 7. Pengaruh tekanan *input* terhadap kapasitas pendinginan

3.3. Pengaruh Tekanan *Input* Terhadap Kapasitas Pendinginan dan Temperatur Udara Dingin

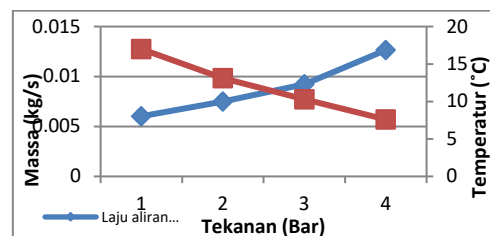
Pada Gambar 8 dapat dilihat pada tekanan 1 Bar bahwa temperatur udara dingin keluaran hanya mencapai temperatur 17 °C dan kapasitas pendinginan 46,96 Watt, pada tekanan 2 Bar sebesar 85,22 Watt dengan temperatur dingin 13,1°C, pada tekanan 3 Bar sebesar 129,08 Watt dengan temperatur dingin 10,1°C dan pada tekanan 4 Bar sebesar 204,25 Watt dengan temperatur dingin 7,6°C.



Gambar 8. Pengaruh tekanan *input* terhadap Q_c dan T_c

3.4. Pengaruh Tekanan *Input* Terhadap Laju Aliran Massa dan Temperatur Udara Dingin

Nilai laju aliran massa berbanding terbalik dengan temperatur udara dingin keluaran apabila nilai temperatur udara dingin keluaran rendah maka nilai laju aliran massa semakin tinggi seperti pada Gambar 9 terjadi karena apabila semakin besar tekanan *input* yang masuk ke dalam sistem maka temperatur udara dingin keluaran semakin rendah. Hal tersebut disebabkan massa udara dingin lebih berat dibandingkan dengan massa udara biasa.

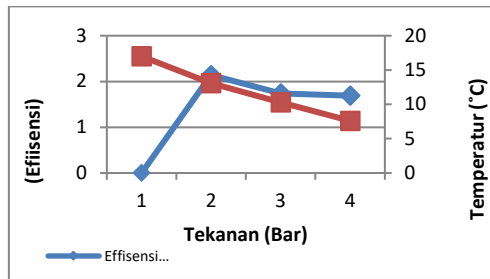


Gambar 9. Pengaruh tekanan *input* terhadap \dot{m}_c dan T_c

3.5. Pengaruh Tekanan *Input* Terhadap Efisiensi Adiabatic dan Temperatur Udara Dingin

Nilai *efisiensi* adiabatic dengan garis biru dan temperatur udara dingin keluaran dengan garis

merah, berdasarkan Gambar 10 nilai *efisiensi* adiabatic sitem refrigerasi tabung *vortex* berbanding lurus dengan temperatur udara dingin keluaran, semakin rendah temperatur udara dingin dan semakin besar tekanan *input* yang masuk ke dalam sistem maka nilai *efisiensi* adiabatic semakin kecil. Hal tersebut disebabkan apabila tekanan *input* semakin besar maka semakin besar juga nilai pembagi untuk penurunan temperatur separasi udara akibat ekspansi isentropik.



Gambar 10. Pengaruh tekanan *input* terhadap η dan T_c

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian, pengujian alat, perhitungan serta analisis data hasil kegiatan tugas akhir yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Temperatur paling rendah udara dingin keluaran pada hasil pengujian alat yaitu pada variasi katup sumbat dengan sudut 30° mampu mencapai temperatur $7,6^\circ\text{C}$ dengan kapasitas pendinginan sebesar 204,25 Watt.
2. Tekanan *input* memengaruhi temperatur udara dingin keluaran dan kapasitas pendinginan tabung *vortex*. Semakin besar tekanan *input* maka semakin besar juga kapasitas pendinginan yang dihasilkan serta temperatur udara dingin keluaran semakin rendah.
3. Variasi sudut katup sumbat sudut 30° , sudut 60° , sudut 90° yang dapat menghasilkan temperatur udara dingin keluaran paling rendah dan kapasitas pendinginan paling tinggi adalah katup sumbat dengan sudut 30° .

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ketua Jurusan Refrigerasi dan Tata Udara Politeknik Negeri Bandung atas dukungan dalam penyusunan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Araujo, Davi Pires, et al. "COBEM-2017-6651 VORTEX TUBE AIR COOLING IN THE TURNING."
- [2] ARORA, C. P. Refrigeration and Air Conditioning. 9th reprint. 2003.
- [3] ASHRAE, 2005. ASHRAE Handbook of Fundamental – secondary Coolants, American.
- [4] French. Ken. *Vertical Integration with a Vortex Tube*, John Brown University, 2005.
- [5] Oliver, Ronan. *Numerical Prediction of Primary and Secondary Flows in a Ranque-Hilsch Vortex Tube*, Thesis Department of Mechanical Engineering School of Mechanical and Transport Engineering, Dublin Institute of Technology, 2008.
- [6] Pourmahmoud, Nader, and Abdol Reza Bramo. "The effect of L/D ratio on the temperature separation in the counter-flow vortex tube." International Journal of research and reviews in Applied Sciences 6.1, 2011.
- [7] Prabakaran.J and Vaidyanathan.S. *Effect of Diameter of Orifice and Nozle on the Performance of Counter Flow Vortex Tube*. International Journal of Engineering, Science and Technology Vol. 2(4), 2010.
- [8] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th ed, McGraw-Hill, 2006.
- [9] Zangana, Lizan Mahmood Khorsheed, and Ramzi Raphael Ibraheem Barwari. "Experimental study and CFD analysis of energy separation in a counter flow vortex tube." Thermal Science 25.1 Part A, 2021.